Guía de Estudio Detallada: CAPÍTULO 15 - Ondas Mecánicas

Este capítulo introduce el concepto fundamental de las ondas, centrándose específicamente en las **ondas mecánicas**. Aprenderás qué son, cómo se describen matemáticamente, cómo interactúan y cómo se forman patrones especiales como las ondas estacionarias.

1. ¿Qué se entiende por Onda Mecánica y cuáles son las diferentes variedades de estas?

- **Definición de Onda**: Una onda es una **perturbación que viaja o se propaga de una región de un sistema a otra** cuando se perturba el estado de equilibrio de dicho sistema. Al propagarse, una onda **transporta energía**, pero no materia.
    - Ejemplos de fenómenos ondulatorios: olas en un estanque, sonidos musicales, temblores sísmicos.
    - **Ondas Electromagnéticas**: A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas (luz, ondas de radio, rayos X) pueden propagarse incluso en el espacio vacío, sin necesidad de un medio.
- **Onda Mecánica**: Una onda mecánica es una perturbación que **viaja a través de un material o una sustancia llamada medio**.
    - El medio mismo no viaja en el espacio; sus partículas individuales realizan movimientos de ida y vuelta, o de arriba y abajo, respecto a sus posiciones de equilibrio. Lo que viaja es el patrón completo de la perturbación ondulatoria.
    - La rapidez de propagación (rapidez de la onda, denotada por v) se determina por las propiedades mecánicas del medio.
- **Variedades de Ondas Mecánicas**:
    - **Onda Transversal**: Los desplazamientos del medio son **perpendiculares o transversales** a la dirección en que la onda viaja.
        - Ejemplo: Impulso en una cuerda tensada. La "ola" en un estadio deportivo es un ejemplo de onda transversal.
    - **Onda Longitudinal**: Los movimientos de las partículas del medio son **hacia adelante y hacia atrás en la misma dirección** en que viaja la onda.

        - Ejemplo: Desplazamiento y fluctuaciones de presión en un líquido o gas en un tubo (como el sonido).
    - Combinación de Ondas Transversales y Longitudinales: En algunos casos, los desplazamientos pueden tener componentes tanto longitudinales como transversales.
        - Ejemplo: Ondas en la superficie de un líquido.

2. Cómo utilizar la relación entre rapidez, frecuencia y longitud de onda en una onda periódica.

- Onda Periódica: Ocurre cuando se da un movimiento repetitivo al extremo libre del medio, lo que hace que cada partícula del medio también experimente un movimiento periódico.
- Onda Sinusoidal (o Senoidal): Un tipo de onda periódica producida por un movimiento armónico simple (MAS). Son importantes porque cualquier onda periódica puede representarse como una combinación de ondas sinusoidales.
    - Amplitud (A): El desplazamiento máximo de una partícula del medio con respecto a su posición de equilibrio.
    - Frecuencia (f): El número de ciclos completos de oscilación por unidad de tiempo, medida en Hertz (Hz o s^{-1}). Todos los puntos de la cuerda oscilan con la misma frecuencia.
    - Periodo (T): El tiempo que tarda un ciclo completo de oscilación (T = 1/f).
    - Longitud de Onda (λ): La distancia de un patrón de onda completo, por ejemplo, la distancia entre una cresta y la siguiente, o un valle y el siguiente.
    - Rapidez de la Onda (v): La rapidez constante con la que el patrón de la perturbación ondulatoria se propaga a través del medio.
        - Relación Clave: La rapidez de la onda es igual al producto de su longitud de onda y su frecuencia: $v = \lambda f$
        - En muchos casos, la rapidez de la onda v depende únicamente de las propiedades mecánicas del medio, no de la frecuencia ni de la amplitud.

        - Si v es constante, un aumento en f provoca una disminución en λ para que su producto se mantenga constante.
    - **Precaución**: No confundir la rapidez de la onda (propagación del patrón) con la rapidez con que se mueven las partículas del medio (que oscilan en su lugar).

3. Cómo interpretar y utilizar la expresión matemática de una onda periódica sinusoidal.

- **Función de Onda y(x, t)**: Describe el desplazamiento y de una partícula del medio en una posición x y en un instante t. Permite calcular el desplazamiento, velocidad y aceleración de cualquier partícula en cualquier momento.
- **Onda Sinusoidal que viaja en la dirección +x**:
    - $y(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$
    - **Otras formas útiles**:
        - $y(x, t) = A \cos[2\pi (x/\lambda - t/T)]$
        - $y(x, t) = A \cos[2\pi f(x/v - t)]$
- **Onda Sinusoidal que viaja en la dirección -x**:
    - $y(x, t) = A \cos(kx + \omega t)$
- **Parámetros Clave en la Función de Onda**:
    - **Número de Onda (k)**: Relacionado con la longitud de onda: $k = 2\pi / \lambda$ (en rad/m).
    - **Frecuencia Angular (ω)**: Relacionado con la frecuencia: $\omega = 2\pi f$ (en rad/s).
    - **Relación entre v, ω y k**: $v = \omega/k$
- **Fase de la Onda**: La cantidad $(kx \pm \omega t)$ en la expresión coseno se denomina fase y determina qué parte del ciclo sinusoidal está ocurriendo.
- **Gráficas de la Función de Onda**:
    - **y(x, t) vs x (t fijo)**: Muestra la forma de la cuerda en un instante dado (como una fotografía).
    - **y(x, t) vs t (x fijo)**: Muestra el movimiento de una partícula específica del medio en función del tiempo.
- **Velocidad y Aceleración Transversales de las Partículas (vy, ay)**:

    - $v_y(x, t) = \partial y(x, t)/\partial t = \omega A \operatorname{sen}(kx - \omega t)$
    - $a_y(x, t) = \partial^2 y(x, t)/\partial t^2 = -\omega^2 A \cos(kx - \omega t) = -\omega^2 y(x, t)$
- Ecuación de Onda: Una ecuación diferencial parcial fundamental que satisface cualquier función de onda físicamente posible: $\partial^2 y(x, t)/\partial x^2 = (1/v^2)\ \partial^2 y(x, t)/\partial t^2$
    - Su forma lineal es la razón por la que se cumple el principio de superposición.

4. Cómo calcular la rapidez de las ondas en una cuerda.

- La rapidez de las ondas transversales en una cuerda depende de dos propiedades físicas:
    - Tensión (F): La fuerza de estiramiento en la cuerda. A mayor tensión, mayor rapidez de onda.
    - Densidad Lineal de Masa (μ): La masa de la cuerda por unidad de longitud (μ = masa/longitud). A mayor masa por unidad de longitud, menor rapidez de onda.
- Fórmula de la Rapidez de Onda en una Cuerda: $v = \sqrt{(F/\mu)}$
    - Esta expresión general aplica a muchos tipos de ondas mecánicas, donde la "fuerza de restitución" (como la tensión) se opone a la "inercia" (como la densidad de masa).

5. Cómo calcular la rapidez con la que una onda mecánica transporta energía.

- Las ondas transportan energía, lo que se manifiesta en fenómenos como el calentamiento de la superficie terrestre por la luz solar o el daño causado por ondas sísmicas.
- Potencia (P): Es la rapidez con que se transfiere energía. Para una onda transversal en una cuerda, la potencia instantánea es el producto de la fuerza transversal (Fy) y la velocidad transversal (vy) de un punto.
    - $P(x, t) = F_y(x, t)v_y(x, t) = -F\ (\partial y/\partial x)\ (\partial y/\partial t)$
- Potencia Media (P_{med}): El valor promedio de la potencia instantánea a lo largo del tiempo.
    - Para una onda sinusoidal en una cuerda, la potencia instantánea nunca es negativa, lo que significa que la energía siempre fluye en la dirección de propagación.

    - $P_{med} = (1/2)\sqrt{(\mu F)}\ \omega^2 A^2$
    - La potencia media es proporcional al **cuadrado de la amplitud (A^2)** y al **cuadrado de la frecuencia (f^2)**. Esta proporcionalidad es un resultado general para ondas mecánicas.
- **Intensidad (I)**: Para ondas que se propagan en tres dimensiones (como el sonido en el aire o las ondas sísmicas), la intensidad es la rapidez media con que la onda transporta energía por unidad de área, a través de una superficie perpendicular a la dirección de propagación.
    - Se mide en watts por metro cuadrado (W/m^2).
    - **Ley del Cuadrado Inverso para la Intensidad**: Si las ondas se propagan uniformemente en todas direcciones desde una fuente puntual, la intensidad a una distancia r de la fuente es inversamente proporcional a r^2.
        - $I_1/I_2 = r_2^2/r_1^2$

6. Qué sucede cuando las ondas mecánicas se superponen y se interfieren entre sí.

- **Reflexión de Ondas**: Cuando una onda choca contra las fronteras de su medio, se refleja parcial o totalmente.
    - **Extremo Fijo**: Si el extremo de la cuerda está sujeto rígidamente, la onda reflejada se mueve en dirección opuesta y su **desplazamiento es opuesto (invertido)** al del pulso incidente.
    - **Extremo Libre**: Si el extremo puede moverse sin resistencia (ej. anillo deslizante), la onda reflejada se mueve en dirección opuesta, pero su **desplazamiento es el mismo (no invertido)** que el del pulso incidente.
    - Las condiciones en el extremo del medio se llaman **condiciones de frontera**.
- **Principio de Superposición**: Cuando dos o más ondas pasan por la misma región al mismo tiempo, el desplazamiento real de cualquier punto del medio en cualquier instante es la **suma algebraica de los desplazamientos que tendría el punto si solo estuviera presente cada onda individual**.
    - $y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t)$
    - Este principio es válido porque la ecuación de onda es lineal.

- Interferencia: La superposición de ondas se denomina interferencia.
  - Interferencia Destructiva: Los desplazamientos de las ondas se cancelan (dan un resultado cero o muy pequeño).
  - Interferencia Constructiva: Los desplazamientos de las ondas se suman (dan un resultado grande).

7. Las propiedades de las ondas estacionarias en una cuerda y cómo analizar tales ondas.

- Onda Estacionaria: Se forma cuando una onda sinusoidal y su onda reflejada (de amplitud, periodo y longitud de onda iguales, pero viajando en direcciones opuestas) se superponen. El patrón de la onda permanece en la misma posición a lo largo de la cuerda, y su amplitud fluctúa.
  - A diferencia de las ondas viajeras, las ondas estacionarias no transportan energía neta de un extremo al otro.
- Nodos (N): Puntos en la cuerda que nunca se mueven (desplazamiento cero). Aquí ocurre interferencia destructiva.
- Antinodos (A): Puntos donde la amplitud de movimiento es máxima. Aquí ocurre interferencia constructiva.
- Distancia entre Nodos o Antinodos Sucesivos: Es siempre $\lambda/2$ (media longitud de onda).
- Función de Onda para una Onda Estacionaria (extremo fijo en x = 0):
  - Resulta de la superposición de una onda incidente y una reflejada invertida ($y_1(x,t) = -A \cos(kx + \omega t)$ y $y_2(x,t) = A \cos(kx - \omega t)$):
  - $y(x, t) = (A_SW \text{ sen } kx) \text{ sen } \omega t$
    - Donde A_SW = 2A es la amplitud de la onda estacionaria.
    - Los nodos se encuentran en las posiciones x donde sen(kx) = 0, es decir: $x = 0, \lambda/2, 2\lambda/2, 3\lambda/2, \ldots = n(\lambda/2)$ (para n = 0, 1, 2, 3, ...)

8. Cómo los instrumentos musicales de cuerda producen sonidos de frecuencias específicas.

- Modos Normales: Cuando una cuerda de longitud L está fija en ambos extremos, solo pueden existir ondas estacionarias si la longitud de la cuerda es un múltiplo entero de media longitud de onda.

    - $L = n(\lambda/2)$, donde $n = 1, 2, 3, ...$
    - Esto implica que las **longitudes de onda posibles** son: $\lambda_n = 2L/n$
    - A cada longitud de onda posible corresponde una **frecuencia de onda estacionaria** ($f_n = v/\lambda_n$).
        - $f_n = n(v/2L) = n f_1$ (para n = 1, 2, 3, ...)
- **Armónicos y Sobretonos**:
    - **Frecuencia Fundamental (f_1)**: La frecuencia más baja posible ($n = 1$), dada por $f_1 = v/2L$.
    - **Armónicos**: Las frecuencias f_n son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental ($2f_1$, $3f_1$, etc.).
    - **Sobretonos**: A f_2 se le llama el primer sobretono (y segundo armónico), a f_3 el segundo sobretono (y tercer armónico), y así sucesivamente.
- **Relación con las Propiedades de la Cuerda**: Sustituyendo $v = \sqrt{(F/\mu)}$ en la expresión de f_1: $f_1 = (1/2L)\sqrt{(F/\mu)}$
    - Esta es la frecuencia fundamental de la onda sonora producida por la cuerda al vibrar.
    - **L, F y μ determinan el tono**:
        - **Longitud (L)**: Cuerdas más largas producen notas más graves (menor frecuencia). En instrumentos, la longitud vibrante se cambia presionando la cuerda contra el diapasón.
        - **Tensión (F)**: Aumentar la tensión F incrementa la rapidez de la onda v y, por lo tanto, la frecuencia. Los instrumentos se "afinan" ajustando la tensión.
        - **Densidad Lineal de Masa (μ)**: Aumentar μ disminuye la rapidez de la onda y, por lo tanto, la frecuencia. Las cuerdas más gruesas (mayor μ) producen notas más bajas.
- **Ondas Estacionarias Complejas**: Cuando una cuerda se golpea o pulsa, vibran simultáneamente la frecuencia fundamental y muchos sobretonos. El movimiento resultante es una combinación o superposición de muchos modos normales, lo que produce un tono rico y complejo.

Glosario de términos clave

• **Onda Mecánica:** Una perturbación que viaja a través de un material o sustancia llamada medio, transportando energía.
• **Medio:** El material o sustancia a través del cual una onda mecánica se propaga.
• **Onda Transversal:** Una onda en la que las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda.
• **Onda Longitudinal:** Una onda en la que las partículas del medio se mueven paralelamente a la dirección de propagación de la onda.
• **Rapidez de Propagación (v):** La velocidad con la que el patrón de una onda viaja a través del medio.
• **Onda Periódica:** Una onda en la que cada punto del medio experimenta un movimiento repetitivo o periódico.
• **Onda Sinusoidal:** Un tipo de onda periódica en la que el patrón de la onda es una función seno o coseno repetitiva, y las partículas del medio experimentan movimiento armónico simple.
• **Amplitud (A):** El desplazamiento máximo de una partícula del medio desde su posición de equilibrio.
• **Frecuencia (f):** El número de ciclos completos de una onda que pasan por un punto por unidad de tiempo, medida en Hertz (Hz).
• **Periodo (T):** El tiempo que tarda un ciclo completo de una onda en pasar por un punto, inversamente relacionado con la frecuencia ($T = 1/f$).
• **Longitud de Onda (λ):** La distancia espacial entre dos puntos correspondientes consecutivos en un patrón de onda (ej. cresta a cresta, valle a valle).
• **Frecuencia Angular (ν):** Relacionada con la frecuencia por $\nu = 2\pi f$, medida en radianes por segundo (rad/s).
• **Número de Onda (k):** Relacionado con la longitud de onda por $k = 2\pi / \lambda$, medida en radianes por metro (rad/m).
• **Función de Onda (y(x, t)):** Una expresión matemática que describe el desplazamiento de una partícula del medio en una posición x y en un instante t.
• **Ecuación de Onda:** Una ecuación diferencial parcial que rige la propagación de las ondas en un medio.
• **Tensión (F):** La fuerza de estiramiento en una cuerda, un factor que determina la rapidez de las ondas transversales en ella.
• **Densidad Lineal de Masa (μ):** La masa por unidad de longitud de una cuerda (μ = m/L), un factor que determina la rapidez de las ondas transversales en ella.
• **Potencia Instantánea (P(x, t)):** La rapidez con la que se transfiere energía en un punto específico de la onda en un instante dado.

• **Potencia Media (Pmed):** La rapidez promedio de transferencia de energía de una onda.
• **Intensidad (I):** La rapidez media de transferencia de energía por unidad de área, a menudo para ondas que se propagan en tres dimensiones, medida en W/m^2.
• **Ley del Cuadrado Inverso:** Principio que establece que la intensidad de una onda que se propaga uniformemente desde una fuente puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente ($I \propto 1/r^2$).
• **Reflexión de Ondas:** El fenómeno en el que una onda rebota cuando encuentra una frontera o un obstáculo en su medio.
• **Extremo Fijo:** Una condición de frontera donde el extremo de una cuerda no puede moverse; la onda reflejada se invierte.
• **Extremo Libre:** Una condición de frontera donde el extremo de una cuerda puede moverse sin resistencia; la onda reflejada no se invierte.
• **Interferencia:** El fenómeno que ocurre cuando dos o más ondas se superponen en la misma región del medio.
• **Principio de Superposición (Lineal):** Establece que el desplazamiento total resultante de la superposición de ondas es la suma algebraica de los desplazamientos de las ondas individuales.
• **Onda Estacionaria:** Una onda formada por la superposición de dos ondas que viajan en direcciones opuestas, resultando en un patrón que no parece moverse a lo largo del medio, con puntos fijos llamados nodos y puntos de máxima amplitud llamados antinodos.
• **Nodos:** Puntos en una onda estacionaria donde el desplazamiento es siempre cero debido a la interferencia destructiva.
• **Antinodos:** Puntos en una onda estacionaria donde la amplitud del movimiento es máxima debido a la interferencia constructiva.
• **Frecuencia Fundamental (f1):** La frecuencia más baja de un modo normal de vibración en un sistema oscilante, como una cuerda fija en ambos extremos.
• **Armónicos:** Múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (2f1, 3f1, etc.), que representan otras frecuencias de modo normal de vibración.
• **Sobretonos:** Término musical que se refiere a los armónicos superiores (f2 es el primer sobretono, f3 el segundo sobretono, etc.).
• **Modo Normal:** Un movimiento de un sistema oscilante en el que todas las partículas del sistema se mueven sinusoidalmente con la misma frecuencia y un patrón de vibración característico.
• **Análisis Armónico/Serie de Fourier:** El proceso de representar una onda compleja como una combinación o superposición de funciones sinusoidales (modos normales).